

О РАСЧЕТЕ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ФЕРРОМАГНИТНОЕ НЕЭЛЕКТРОПРОВОДНОЕ ТЕЛО, РАСПОЛОЖЕННОЕ В СОЛЕНОИДЕ.

Черников В.Ю., Эсауленко В.А., Корощенко А.В.

Донецкий государственный технический университет, кафедра ТОО

Abstract

Chernikov V.Y., Esaulenko V.A., Koroshchenko A.V. On influence of ferromagnetic tel on magnetic field in different spots of axial solenoid channel. In the article studied influence ferromagnetic dispersed tel on the magnetic field of solenoid depending on coordinates and single-line sizes of tel. Brought results of comparisons of accounting and experimental values to inductions of magnetic field.

Учитывая (4), (11)-(16) составим структурную схему СНС (рис.1).

Электромагнитные устройства, ускоряющие или перемещающие с постоянной скоростью частицы ферромагнитного материала, находят применение в черной и цветной металлургии, в литейном производстве [1].

Одной из основных задач, возникающих при разработке таких устройств, является количественная оценка магнитных сил, воздействующих на сгусток частиц при различном его положении внутри рабочего канала силового индуктора, а также определение степени влияния на результирующую магнитную силу физических параметров самого разгоняемого сгустка частиц. Практическое значение имеет также определение области изменения параметров тела, в которой правомерно использование приближенных методов расчета сил.

Силы магнитного воздействия на сгусток частиц ферромагнитного материала можно разделить на два различных типа. К первому относятся макроскопические пондеромоторные силы, ко второму - так называемые стрикционные силы, обусловленные стремлением ферромагнитных тел деформироваться под влиянием магнитного поля [2]. В данной работе вследствие проведенного анализа результатов экспериментов было принято

допущение, по которому сгусток частиц рассматривается как абсолютно твердое тело и, следовательно, стрикционные силы не учитываются.

В основу расчета магнитных сил, действующих в неоднородном поле индуктора на ферромагнитное тело, положено известное соотношение, определяющее величину магнитной силы \vec{f} , действующей на единичную площадку границы раздела двух сред с различными магнитными проницаемостями [3]:

$$\vec{f} = (B_{n2}\vec{H}_2 - B_{n1}\vec{H}_1) - (B_2H_2 - B_1H_1)\vec{n}, \quad (1)$$

где H_1, B_1, H_2, B_2 - напряженность и индукция магнитного поля соответственно в первой и второй средах, непосредственно у границы их раздела. Положительное направление нормали \vec{n} выбрано из первой среды во вторую. Учитывая соотношения:

$$B_{1n} = B_{2n} = \mu_1 H_{n1} = \mu_2 H_{n2},$$

для магнитного давления получаем:

$$f = \frac{1}{2}(\mu_2(H_{n2}^2 - H_{\tau2}^2) - \mu_1(H_{n1}^2 - H_{\tau1}^2)), \quad (2)$$

где μ_1 и μ_2 - магнитная проницаемость соответственно первой и второй сред, $H_{n2}, H_{\tau2}, H_{n1}, H_{\tau1}$ - нормальные и тангенциальные составляющие векторов напряженности магнитного поля на границе раздела сред. Принимая во внимание, что индекс 1 соответствует ферромагнитной среде, для которой $\mu_1 = \mu_0$, а индекс 2 - среде с $\mu_2 = \mu_m$, выразим магнитное давление следующим образом:

$$f = \frac{1}{2}(\mu_m - \mu_0)(H_{\tau2}^2 - \frac{\mu_0}{\mu_m}H_{n2}^2), \quad (3)$$

Заметим при этом, что в рассматриваемом классе устройств второй средой является окружаемый разгоняемый сгусток частиц воздух или неферромагнитный трубопровод (рис.1).

При известном законе распределения магнитного давления имеется возможность рассчитать силу магнитного воздействия на разгоняемое тело, учитывая, что ее аксиальная и радиальная составляющие определяются следующими интегральными соотношениями:

$$\bar{F}_z = \int_{s1} \bar{f}_1 dS_1 + \int_{s2} \bar{f}_2 dS_2, \quad \bar{F}_r = \int_{s3} \bar{f}_3 dS_3. \quad (4)$$

Вследствие осевой симметрии индуктора соленоидного типа и принятой цилиндрической формы разгоняемого сгустка частиц радиальная составляющая результирующей силы равна нулю.

Расчет магнитных сил производился на ЭВМ методом конечных разностей после применения метода сведения вихревого магнитного поля токов к полю скалярных магнитных зарядов.

Исследуемый индуктор имел относительные размеры: внутренний диаметр - $d_{\text{вн}} = \ell/3$, внешний диаметр - $d_{\text{внш}} = \ell$, длину - ℓ . Задача решалась в линейной постановке, магнитная проницаемость элементов кожуха индуктора принималась равной $100 \mu_0$. Магнитная проницаемость сгустка ферромагнитных частиц μ_m считалась постоянной и определялась из зависимости μ (Н) разгоняемого материала при напряженности магнитного поля равной напряженности на оси соленоида в точке, соответствующей максимуму магнитной силы. Координаты этой точки могут быть достаточно легко определены аналитически (2)-(4).

Для оценки погрешности данной методики расчета магнитных сил был поставлен ряд экспериментов, результаты которых (показанные точками), а также расчетные значения (показанные линией) аксиального распределения результирующей магнитной силы для тел с различными физическими параметрами приведены на рис.3. На рис.3а показаны зависимости при $\mu_m = 2\mu_0$, а на рис.3б - при $\mu_m = 5\mu_0$.

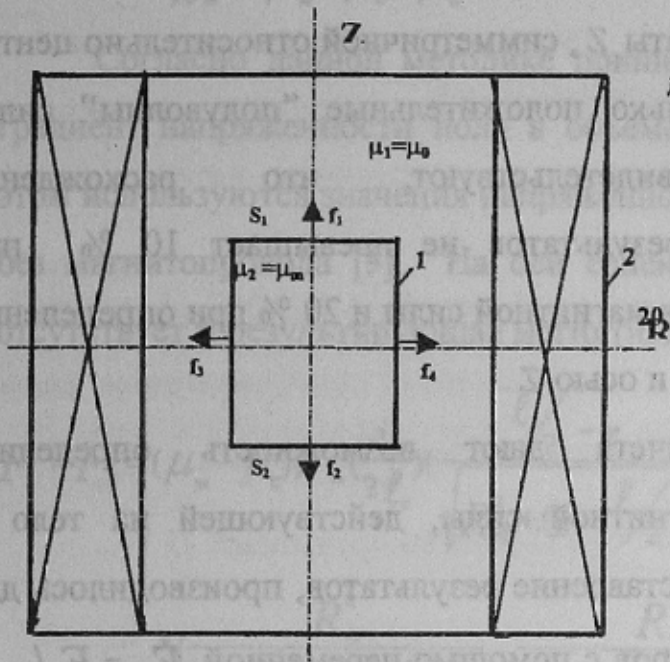


Рисунок 1-К расчету сил, действующих в магнитном поле индуктора на разгоняемое ферромагнитное тело.

- 1- разгоняемое тело.
- 2- соленоид индуктора.

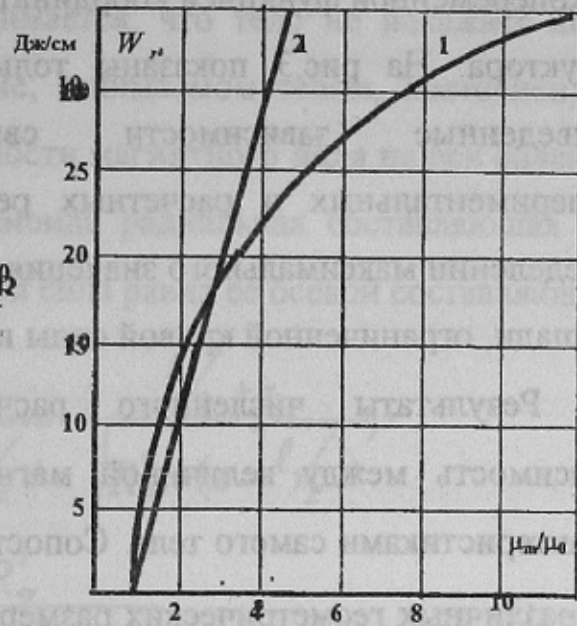


Рисунок 2-Удельное значение кинетической энергии, сообщаемой телу магнитным полем.

- 1- с учетом влияния тела на поле.
- 2- без учета влияния тела на поле.

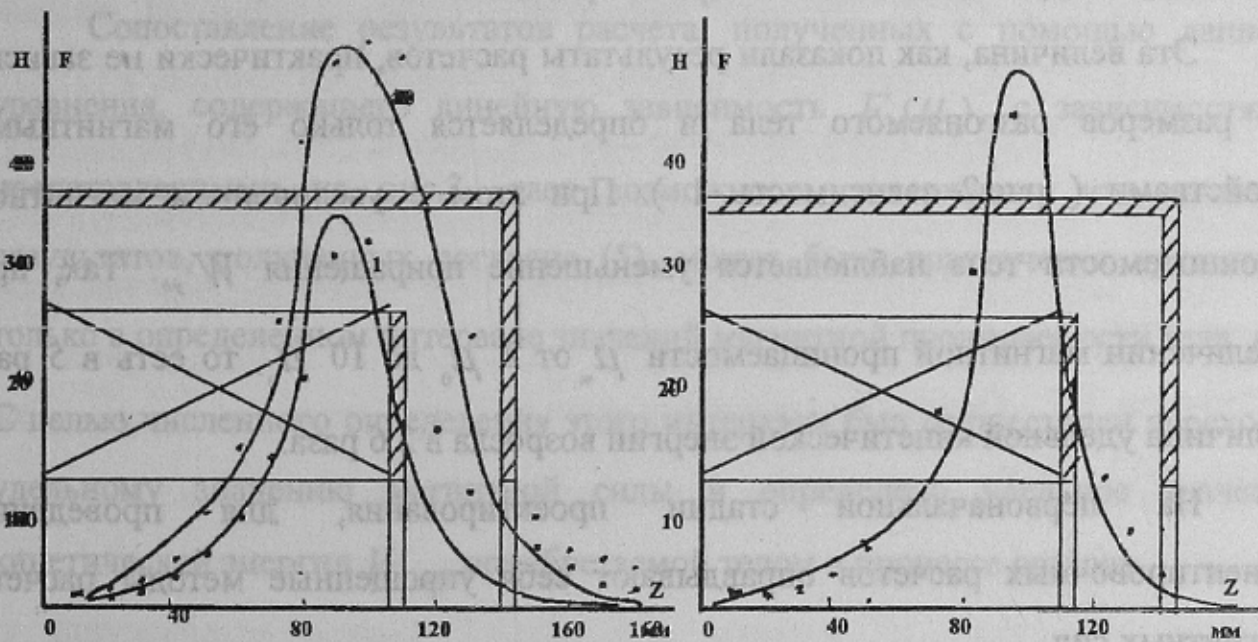


Рисунок 3-Аксиальное распределение магнитных сил, действующих в рабочем канале индуктора на тела с различными размерами и магнитными свойствами: а) длина тела 20мм и 40мм; б) длина тела 45мм

При построении кривых координате Z придавалось значение осевой координаты центра тяжести тела. Магнитная сила F_z является знакопеременной функцией координаты Z , симметричной относительно центра индуктора. На рис.3 показаны только положительные "полуволны" силы. Приведенные зависимости свидетельствуют, что расхождение экспериментальных и расчетных результатов не превышает 10 % при определении максимального значения магнитной силы и 20 % при определении площади, ограниченной кривой силы и осью Z .

Результаты численного расчета дают возможность определить зависимость между величиной магнитной силы, действующей на тело и характеристиками самого тела. Сопоставление результатов, производилось для тел различных геометрических размеров с помощью переменной $F_{y0} = F_z / m$, представляющей собой силу, действующую на единицу объема m разгоняемого тела, то есть удельную силу. Площадь, образованная этой кривой $F_{y0}(z)$ и осью Z , можно рассматривать как меру кинетической энергии W_{y0} , сообщаемой единице объема тела при его разгоне.

Эта величина, как показали результаты расчетов, практически не зависит от размеров разгоняемого тела и определяется только его магнитными свойствами (рис.2 зависимость 1). При этом с увеличением магнитной проницаемости тела наблюдается уменьшение приращения W_{y0} . Так, при увеличении магнитной проницаемости μ_m от $2 \mu_0$ до $10 \mu_0$, то есть в 5 раз, величина удельной кинетической энергии возросла в 2,6 раза.

На первоначальной стадии проектирования, для проведения ориентировочных расчетов оправдывают себя упрощенные методы расчета магнитных сил.

В работах, посвященных созданию магнитных устройств для транспортирования ферромагнитных насыпных грузов, широкое применение нашла методика, по которой магнитная сила определяется по формуле [4-5]:

$$F = \mu_0 \chi_m V_m H \text{ grad} H, \quad (5)$$

где $\chi_m = (\mu_m - \mu_0) / \mu_0$ - магнитная восприимчивость тела,

Согласно данной методике принимается, что тело не искажает поле и градиент напряженности поля в объеме, занимаемом телом, постоянен. При этом используются значения напряженности магнитного поля на оси соленоида без магнитопровода [5]. На оси соленоида радиальная составляющая силы отсутствует и результирующая магнитная сила равна ее осевой составляющей:

$$F = F_z = (\mu_m - \mu_0) V_m \left(\frac{i_n}{2\ell_c} \right) \left(\frac{\ell_c/2 - z}{\sqrt{R_{cp}^2 + (z - \ell_c/2)^2}} + \frac{\ell_c/2 + z}{\sqrt{R_{cp}^2 + (z + \ell_c/2)^2}} \right) * \\ * \left(\frac{R_{cp}^2}{(R_{cp}^2 + (z + \ell_c/2)^2)^{3/2}} - \frac{R_{cp}^2}{(R_{cp}^2 + (z - \ell_c/2)^2)^{3/2}} \right), \quad (6)$$

здесь i_n - полный ток соленоида, ℓ_c - длина соленоида, R_{cp} - средний радиус витков соленоида, z - осевая координата, отсчитываемая от центра соленоида.

Сопоставление результатов расчета, полученных с помощью данного уравнения, содержащего линейную зависимость $F_z(\mu_m)$, с зависимостями, представленными на рис.3, дает возможность утверждать, что точность результатов, полученных согласно (5), может быть практически приемлема только в определенном интервале значений магнитной проницаемости тела μ_m . С целью численного определения этого интервала был осуществлен переход к удельному значению магнитной силы и определено удельное значение кинетической энергии $W_{\text{уд}}$, приобретаемой телом в процессе разгона.

Выводы

1. Разработана уточненная методика численного расчета магнитных сил, воздействующих со стороны магнитного поля соленоидного индуктора на сгусток ферромагнитного материала с использованием метода конечных разностей.
2. Сопоставление результатов расчета с приближенной методикой расчета сил (5) позволяет утверждать о том, что применение приближенного расчета возможно при магнитной проницаемости материала $\mu_m \leq 3,5 \mu_0$.
Расхождение результатов расчета в этом случае не превышает 25 %.

Литература

1. Эсауленка В.А. Разработка технологических и транспортных устройств с непосредственным воздействием электромагнитных полей на сыпучие ферромагнитные материалы. Доклады конференции "Творческое наследие В.И.Вернадского и современность". ДонГТУ. Донецк-95, с.49-50.
2. Тамм И.Е. Основы теории электричества. - М.: Наука, 1976. - 616 с.
3. Шимони К. Теоретическая электротехника. - М.: Мир, 1964. - 775с.
4. Деркач В.Г. Специальные методы обогащения полезных ископаемых. - М.: Недра, 1966. - 338с.
5. Штокман И.Г. Основы создания магнитных транспортных установок. - М.: Недра, 1972. - 192с.